



UASB 和微生物固定化反应器降解含聚废水组合工艺

刘江红¹, 潘 洋², 谷璟瑶³, 贾云鹏¹, 芦 艳¹

(¹东北石油大学化学化工学院, 石油与天然气化工省高校重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; ²同联集团沈阳抗生素厂, 辽宁 沈阳 110122; ³厦门大学生命科学学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 随着聚合物驱油技术在油田的广泛推广, 部分水解聚丙烯酰胺 (HPAM) 在为油田提高采收率的同时, 对当地环境也产生了相当大的危害。本文在对含聚污水水质分析和可生化性分析的基础上对污水进行可生化性调整, 运用“气浮-UASB-水解酸化-微生物固定化反应器”组合工艺对含聚污水进行了生化处理模拟实验。模拟实验分为静态模拟和动态模拟两部分。静态模拟实验中, 降解 6 天后, 聚丙烯酰胺降解率达到 89.7%。动态模拟实验中, 组合工艺处理 2 天以后, HPAM 降解率为 88.65%, 原油总去除率为 99.40%, 出水 COD 总去除率为 93.40%。利用扫描电镜 (SEM) 和红外光谱分析聚丙烯酰胺降解产物, 显示 HPAM 由大分子物质断裂成小分子物质, HPAM 的酰胺基转化为羧基。

关键词: 生物降解; 部分水解聚丙烯酰胺; 含聚污水; 组合工艺

中图分类号: X 741

文献标志码: A

文章编号: 1000-6613 (2013) 07-1701-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-6613.2013.07.042

Degradation of HPAM-containing wastewater with integrated process of UASB and immobilized microorganism reactor

LIU Jianghong¹, PAN Yang², Gu Jingyao³, JIA Yunpeng¹, LU Yan¹

(¹Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Chemical Technology, College of Chemistry & Chemical Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China; ²Tonglian Group, Shenyang Antibiotic Manufacturer, Shenyang 110122, Liaoning, China; ³School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: Polymer flooding technique has become an important method of enhanced oil recovery. But the application of partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) in oilfield meets many environmental problems. Based on water analysis and biodegradability analysis of HPAM-containing wastewater, improved biodegradability of wastewater was achieved. Laboratory simulation treatment of wastewater was performed by the “flotation-up-flow anaerobic sludge bed (UASB)-hydrolysis acidification-immobilized microorganism reactor” integrated process. There were two parts in simulation experiment, one was static, and the other was dynamic. After 2 d static biochemical treatment, the degradation ratio of HPAM in wastewater was up to 89.7%. And in dynamic simulation experiment, after 2 d treatment, the degradation ratio of HPAM was up to 88.65%, that of oil was 99.40%, that of COD was 93.40%. HPAM degradation products were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and infrared spectroscopy. The results showed that HPAM was transformed from bigger molecules into smaller molecules and acylamino group in HPAM was transformed into carboxyl group.

Key words: biodegradation; HPAM; HPAM-containing wastewater; integrated process

收稿日期: 2012-12-28; 修改稿日期: 2013-02-05。

基金项目: 国家 863 计划项目 (2008AA06Z304)。

第一作者及联系人: 刘江红 (1966—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向环境生物技术和土壤环境、水处理。E-mail: ljhread@126.com。

部分水解聚丙烯酰胺 (partially hydrolyzed polyacrylamide, HPAM) 目前被广泛用于三次采油中, 而在提高采收率的同时, 绝大多数聚丙烯酰胺进入地下油层, 由于地层结构的原因, 很难避免其渗透到地下水层^[1-3]。聚丙烯酰胺在地面水体和地下水中的长期滞留, 必将对当地水环境造成潜在的危害^[4-5]。

在多种含聚污水处理方法中, 生物法因为其高效、无二次污染的优势得到重视^[6]。关键的问题是寻求可以产生还原物质的微生物, 促进聚丙烯酰胺的连锁氧化降解反应^[7-8], 打破聚丙烯酰胺主链, 降低分子量和黏度, 最终使聚丙烯酰胺被降解^[9-10]。同时微生物固定化技术作为现代生物工程领域中的一项新兴技术, 具有生物利用率高、菌体流失少、能够抵抗有毒有害物质、处理效率高等特点^[11-12]。上流式厌氧污泥床反应器 (UASB) 使用一种方法很难达到预期的处理效果的^[13]。

本文利用本实验室筛选出来的能够以聚丙烯酰胺作为唯一碳源和氮源的菌株, 采用海藻酸钠作为微生物固定化的载体, 对 3 种菌的混合菌进行了固定化实验, 将制得的固定化颗粒应用于处理含聚废水, 采用 UASB 和微生物固定化法相结合, 即厌氧+好氧工艺组合, 为大规模工业化处理高浓度含聚污水提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

(1) 菌株来源: 从含聚污水中筛选的能够以 HPAM 作为唯一碳源和氮源的实验室保藏菌种 M1, B2 和 B3。

(2) 污水、污泥均来自大庆炼化污水处理厂。

(3) 原油为大庆油田采油四厂原油, 20℃下密度 862.8 kg/m³, 凝点 31℃, 蜡含量 27.80%, 硫含量 0.13%, 属于高蜡低硫原油。

(4) 实验用聚丙烯酰胺, 相对分子质量 1.5×10⁶, 水解 24.14%, 固含量 89.44%, 大庆油田助剂厂生产。

1.2 水质分析方法

①聚丙烯酰胺的降解率是采用淀粉-碘化镉比色法测定^[14]。②原油含量的测定方法采用紫外分光光度法^[15]。③污水中化学需氧量(COD)的测定——重铬酸盐法^[15]。④污水中五日生化需氧量(BOD₅)的测定——稀释与接种法^[15]。⑤水中固体悬浮物的测定——重量法^[15]。⑥水中矿化度的测定——重量

法^[15]。⑦水质氨氮的测定——纳氏试剂分光光度法^[15]。

1.3 含聚废水可生化性分析

污水的可生化性评价采用 BOD₅/COD 值, 如表 1 中所列数据评价污水的可生化性。

表 1 废水可生化性评价参考数据^[16]

| BOD ₅ /COD | 可生化性评价 |
|-----------------------|--------|
| <0.2 | 不易生化 |
| 0.2~0.3 | 较难生化 |
| 0.3~0.45 | 可以生化 |
| >0.45 | 易生化 |

1.4 微生物固定化颗粒的制备

将在 35℃、120 r/min 条件下振荡培养箱中驯化和培养后的 M1、B2 和 B3 的菌悬液经 3000 r/min, 5 min 后, 弃去上清液, 得到湿菌体; 以质量分数 3% 的海藻酸钠作为固定化的包埋剂, 按照包埋剂与湿菌体的体积比 1:1 混合, 并加入一定量的活性炭, 使微生物固定化颗粒同时具有包埋法与吸附法的优点。将混合液吸入 10 mL 注射器中, 将其滴入质量分数 3% 的氯化钙中交联 24 h。

1.5 静态模拟实验

为去除部分固体颗粒杂质与上层浮油, 将烧杯中的 2000 mL 含聚污水静止 16 h。取初沉淀后的清液倒入另一烧杯中, 边搅拌边加入 5% 的十二水合硫酸铝钾, 同时对污水进行曝气、静置, 待絮凝物沉淀后取上层清液, 去除下层絮凝物。将新鲜的活性污泥与经气浮处理后的含聚污水以 1:2 的体积比加入到 2000 mL 的烧杯中, 放入 35℃ 恒温培养箱中, 淀粉-碘化镉法每隔 6 h 测聚丙烯酰胺降解率。去除烧杯中的活性污泥, 取下层 1000 mL 含聚污水, 将制得的含有菌体的固定化颗粒与待处理的污水以 1:20 体积比放入 2000 mL 烧杯中, 同时曝气。6 h 后测定聚丙烯酰胺降解率。

1.6 动态模拟实验

本实验采用 UASB 和微生物固定化法相结合, 即厌氧+好氧工艺组合处理含聚污水, 在国内含聚污水处理中该组合工艺是首次采用。组合工艺流程如图 1 所示: 由沉淀池、气浮池、UASB 反应器、水解酸化池、生物固定化池组成。含聚污水经过沉淀池沉淀除去大部分悬浮物后, 上层出水进入气浮池, 加入 5% 的十二水合硫酸铝钾作为絮凝剂, 同时曝气, 污水进入分离区, 原油从上层排出, 絮凝

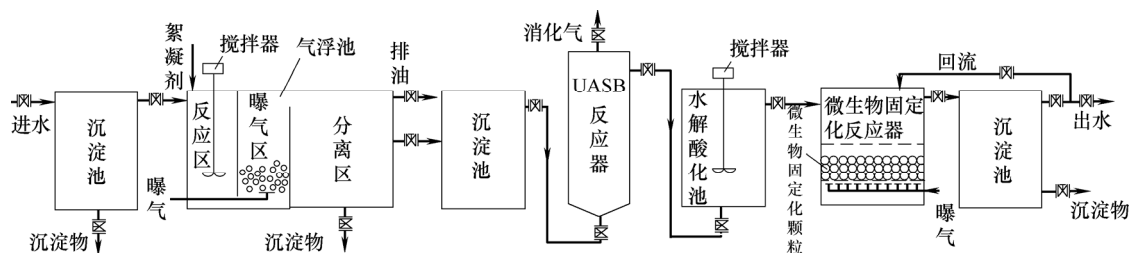


图1 “气浮-UASB-水解酸化-微生物固定化反应器”实验装置及工艺流程

沉淀物由池底排出。之后污水进入 UASB 反应器，经过厌氧污泥处理上层出水进入水解酸化池，上层出水进入生物降解池，在生物降解池中，通过曝气和微生物固定化颗粒的作用，将污水中的大部分有机物分解代谢，进入沉淀池，静置一定时间后，检测出水水质标准，达标后出水。

2 结果与讨论

2.1 菌株 M1、B2 和 B3 形态、生理、生化性质

经筛选、分离、纯化的聚丙烯酰胺降解菌菌株 M1、B2 和 B3 的形态如下：M1 菌株菌落圆形，乳白色，隆起，脐状，湿润，光滑，不透明，菌体球形。B2 菌株菌落圆形，乳白色，边缘整齐，表面光滑，有光泽，湿润，菌体杆形。B3 菌株菌落圆形，暗白色，干燥，无光泽，菌体杆形。菌体电镜照片如图 2 所示。菌株 M1、B2 和 B3 生理、生化性质鉴定如表 2 所示，参照《常见细菌系统鉴定手册》^[17] 及《简明第八版伯杰细菌鉴定手册》^[18]，初步鉴定

M1 为微球菌属 (*Micrococcus Cohn*, 1872)，B2 和 B3 为芽孢杆菌属 (*Bacillus Cohn*, 1872)。

2.2 含 HPAM 采出水水质分析及可生化性调整

含聚合物采出水水质分析结果如表 3 所示，污水中聚合物含量大约为 500 mg/L，由表 3 可知 BOD₅/COD 值为 0.247，根据表 1 的污水可生化性评价参考数据可知，此污水较难生化，因此需要对污水进行可生化性进行调整。采取曝气和添加 K₂HPO₄、KH₂PO₄、NaNO₃ 等营养盐对污水可生化性调整。向污水中加入营养盐可以加速 HPAM 降解菌的生长繁殖，提高微生物的活性，从而提高微生物降解有机物的能力。曝气的作用不仅可以使污水中底部的油和悬浮物质浮到水的表面上，而且可以通过降低 COD，以提高 BOD₅/COD 的比值，气浮可以为污水中微生物提供新陈代谢所需的氧气。

生化性调整后废水的 BOD₅/COD 值如表 4 所示。加入营养物质 K₂HPO₄、NaNO₃、KH₂PO₄ 并曝气 24 h 后污水的 BOD₅/COD 值由 0.247 提高到

表 2 菌株 M1、B2 和 B3 生理、生化鉴定

| 菌株 | 革兰氏染色 | 芽孢 | 接触酶 | 甲基红 | 淀粉水解 | 产 H ₂ S | 吲哚 | V.P 反应 | 葡萄糖发酵 |
|----|-------|----|-----|-----|------|--------------------|----|--------|-------|
| M1 | + | 无 | + | + | — | + | + | + | + |
| B2 | + | 有 | — | — | + | — | — | — | + |
| B3 | + | 有 | — | — | + | — | — | — | + |

注：“+”表示阳性，“—”表示阴性。

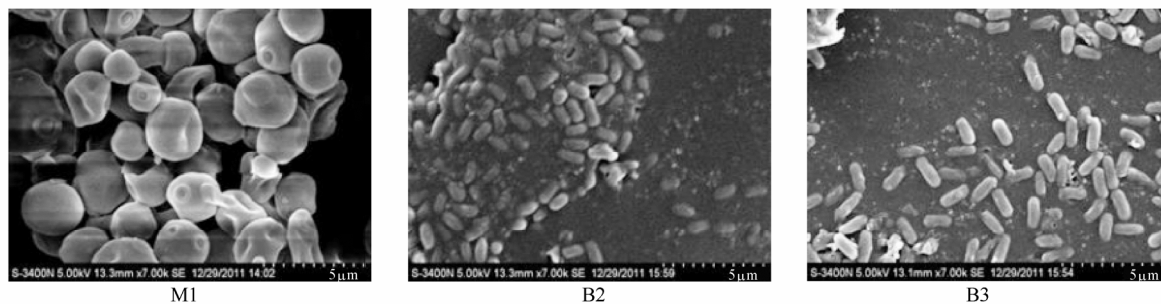


图2 M1、B2 和 B3 菌株电镜扫描照片 (×7K)

表 3 处理前水质分析结果

| 含油量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 固体悬浮物 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | HPAM / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 总矿化度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | BOD ₅ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | pH 值 | 氨氮 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ |
|------------------------------------|--|--|---|---|---|------|---------------------------------------|
| 733.21 | 421.4 | 860.03 | 500.5 | 5100 | 213.02 | 8.41 | 86.4 |

表 4 污水可生化性调整结果

| 污水样品 | COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | BOD ₅ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | BOD ₅ /COD |
|---------|------------------------------------|--|-----------------------|
| 可生化性调整前 | 860.03 | 213.02 | 0.247 |
| 可生化性调整后 | 981.71 | 393.26 | 0.400 |

0.400, 根据可生化性划分标准, 废水可以生化。

2.3 静态模拟实验

经沉淀后的含聚污水表面漂浮一层浮油, 水质较沉淀前清澈, 水中的固体颗粒和泛黄现象得以改善。在加入絮凝剂和曝气的共同作用下可去除大部分的浮油和较轻的悬浮物。经絮凝沉淀后的含聚污水泵入到 UASB 反应器中去除有机污染物, UASB 反应器对聚丙烯酰胺降解率可达到 63.3%。水解酸化池将其中难生物降解的有机物转变为易生物降解的有机物, 提高废水的可生化性, 以利于后续的微生物固定化好氧处理, 水解酸化池对聚丙烯酰胺降解率为 14.2%。微生物固定化反应器对聚丙烯酰胺降解率可达到 89.7%, 高于陈庆国^[19]生化法处理含聚污水的静态模拟实验中降解 7 天后, 聚丙烯酰胺降解率达到 80%。

2.4 动态模拟实验

2.4.1 水力停留时间的确定

在前期考察微生物对聚丙烯酰胺的降解率时, 将制备好的微生物固定化颗粒转移到新鲜的污水中, 在此期间检测出水的聚丙烯酰胺含量、含油量、COD 的变化, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 经过 48 h 以后, 出水水质各项指标趋于稳定。因此, 将

水力停留时间定为 48 h。

2.4.2 工艺流程处理后水质分析

经过组合工艺处理后的水质分析结果如表 5 所示。由表 5 可以看出, 出水 HPAM 浓度由进水的 500.5 mg/L 减少到 56.8 mg/L, 去除率达到 88.65%; 原油由进水的 733.21 mg/L 减少到 4.12 mg/L, 原油总去除率为 99.4%; 进水的 COD 为 860.03 mg/L, 出水 COD 稳定在 56.24 mg/L 左右, COD 总去除率达到 93.4%。本工作采用的组合工艺 2 天后处理的各项出水水质指标优于陈庆国等生物挂膜培养生化法经过组合工艺处理含聚废水 3 天后的出水指标, 陈庆国等采用生物挂膜培养的生化方法经过组合工艺处理含聚废水, 3 天后聚丙烯酰胺的降解率达到 67%, 原油总的去除率为 93%, 出水的 COD 总的去除率达到 80%^[19]。也高于包木太等利用生物接触氧化法处理含聚污水的出水指标, 包木太等聚丙烯酰胺的降解率达到 70%, 原油总的去除率为 90%, 出水的 COD 总的去除率达到 67%^[20]。与其它组合工艺比较, 本组合工艺克服了生物降解法处理含聚污水易出现的菌体流失、微生物利用率低、难以回收等缺点, 提高了含聚污水中聚丙烯酰胺和原油的去除率。

2.5 微生物降解聚丙烯酰胺的产物

(1) 扫描电镜 采用 S-3400N 型扫描电子显微镜观察微生物降解前后聚丙烯酰胺的变化, 如图 4 所示。比较聚丙烯酰胺在降解前后结构的变化, 从图 4(a)可以看出降解前聚丙烯酰胺固体样品的表面十分致密, 几乎没有孔洞, 而图 4(b)所示的微生物固定化降解之后的聚丙烯酰胺固体表面支离破碎, 且有许多孔洞。证明在微生物的生长代谢过程中, 聚丙烯酰胺被微生物作为营养物质被利用, 大分子聚丙烯酰胺断裂为小的碎片、低聚物或其它小分子有机物。

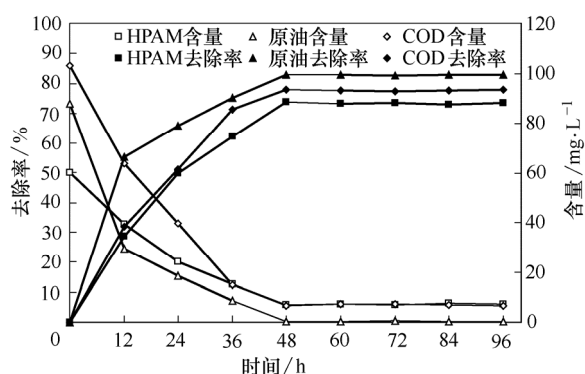
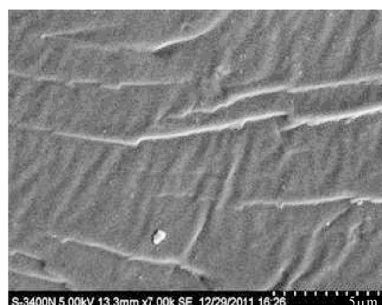


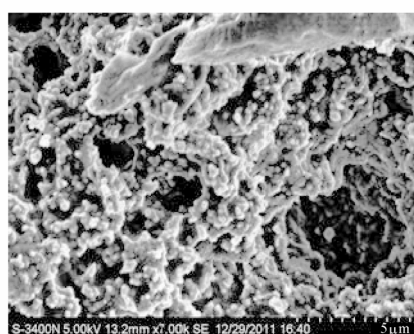
图 3 处理后含聚污水中 HPAM、COD、原油量随时间变化

表 5 处理后水质分析结果

| 含油量 | 原油去 | COD | COD 去 | HPAM | HPAM 去 | pH | 氨氮 | 固体悬浮 | 总矿化度 | BOD ₅ |
|---------------------|------|---------------------|-------|---------------------|--------|------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| /mg·L ⁻¹ | 除率/% | /mg·L ⁻¹ | 除率/% | /mg·L ⁻¹ | 除率/% | 值 | /mg·L ⁻¹ | 物/mg·L ⁻¹ | /mg·L ⁻¹ | /mg·L ⁻¹ |
| 4.12 | 99.4 | 56.24 | 93.4 | 56.8 | 88.65 | 7.41 | 5.6 | 10.6 | 334 | 18.52 |

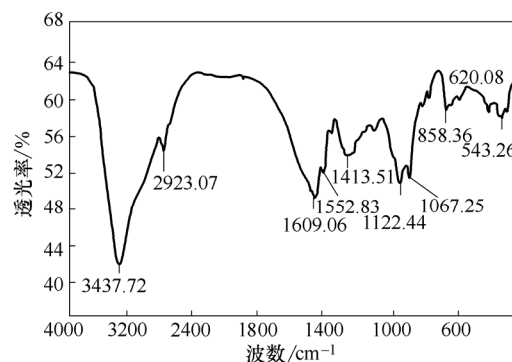


(a) 聚丙烯酰胺固体粉末

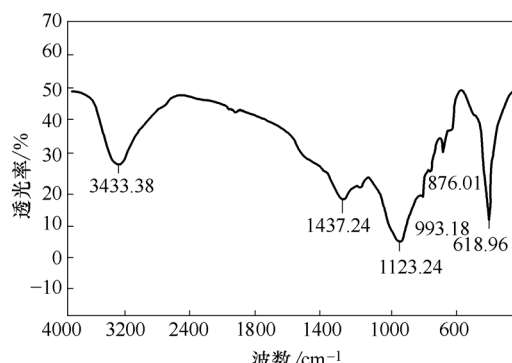


(b) 微生物降解后聚丙烯酰胺固体粉末

图 4 聚丙烯酰胺样品 SEM 图 (×7k)



(a) 降解前



(b) 降解后

图 5 微生物固定化降解前后聚丙烯酰胺红外谱图

(2) 红外光谱图 聚丙烯酰胺在降解前后的红外光谱图如图 5 中所示。图 5(a)在 3437.72 cm^{-1} 处为酰胺基, 1413.51 cm^{-1} 处为 C—N 键, 1450 cm^{-1} 处为 N—H 键。由图 5(b)看出, 1415 cm^{-1} 左右 C—N 伸缩振动峰和 1450 cm^{-1} 左右 N—H 弯曲振动峰已经消失, 说明在微生物降解作用下—NH₂ 基团从聚合物链中脱落, 被微生物新陈代谢所消耗。 3433.38 cm^{-1} 成为一个比较宽大的吸收峰, 说明生物降解后 HPAM 中酰胺基已经被微生物降解分解为羧基, 在 1123.24 cm^{-1} 处的吸收峰强度明显增大, 这可能是因为降解之后的聚丙烯酰胺样品中含有水分。

3 结 论

(1) 利用从含聚污水中筛选的能够以 HPAM 作为唯一碳源和氮源的实验室保藏菌种 M1、B2 和 B3, 运用“气浮-UASB-水解酸化-微生物固定化反应器”组合工艺对含聚废水的处理进行了模拟实验。模拟实验分为静态和动态两部分进行。静态模拟实验聚丙烯酰胺降解率达到 89.7%。动态模拟实验 2 天

后 HPAM 减少到 56.8 mg/L , 去除率达到 88.65%; 原油减少到 4.12 mg/L , 原油总去除率为 99.4%; 出水 COD 稳定在 56.24 mg/L 左右, COD 总去除率达到 93.4%。出水水质指标达到国家一级排放标准。

(2) 通过扫描电子显微镜对微生物固定化工艺处理前后的聚丙烯酰胺进行表征, 结果显示聚丙烯酰胺被微生物降解为小分子物质。对处理前后的聚丙烯酰胺进行红外光谱分析, 结果显示聚丙烯酰胺的酰胺基被降解为羧基。

参 考 文 献

- [1] Bao Mutai, Chen Qingguo. Biodegradation of partially hydrolyzed polyacrylamide by bacteria isolated from production water after polymer flooding in an oil field[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184 (10): 105-110.
- [2] 包木太, 周营营, 陈庆国. 部分水解聚丙烯酰胺溶液稳定性的影响因素[J]. *化工进展*, 2011, 30 (S1): 230-234.

(下转第 1711 页)

—95 工业七水硫酸镁合格品的标准。

上述结果表明,红土镍矿酸浸沉镍废水在室温条件下采用预通空气氧化,加碱式碳酸镁可实现沉镍废液富镁除杂,再经真空浓缩、结晶分离,可制备符合行业标准 HG/T 2680—95 的合格产品,为沉镍废水的处理和资源化应用提供了一条切实可行的方法,具有较大的环境效益和社会效益。

符 号 说 明

S ——溶解度, g/100 g 水

ρ ——离子浓度, mg/L

参 考 文 献

- [1] 马力言. 以硫酸镁废液为原料制备硅钢级氧化镁[D]. 昆明理工大学, 2011.
- [2] 杨群. 沉镍残液处理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [3] 伍博克. 云南元江红土镍矿加压酸浸研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [4] 林培喜, 朱玲. 无机化学与分析化学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 382.
- [5] 翟秀静, 肖碧君, 李乃军. 还原与沉淀[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 296-331.
- [6] 李圭白, 刘超. 地下水除铁除锰[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989: 29-49.
- [7] 薛罡, 赵洪宾. 地下水除铁除锰新进展[J]. 给水排水, 2002 (7): 26-28.
- [8] 江龙. 胶体化学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 76-86.
- [9] 张虹. 中学生化学手册[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2008: 731-733.
- [10] 叶铁林. 化工结晶过程原理及应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006: 137-148.
- [11] 姜俊华, 郝宝玉, 吕红霞. HG/T 2680—95. 工业七水硫酸镁[S]. 中华人民共和国化学工业部, 1996.
-
- (上接第 1694 页)
- [5] Guan Jie, Li Yingshun, Lu Maixi. Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2008, 83 (2): 185-189.
- [6] Pickering S J. Recycling technologies for thermoset composite materials-current status[J]. *Composites, Part A*, 2006, 37 (8): 1206-1215.
- [7] López F A, Martín M I, Alguacil F J, et al. Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass-ceramic material[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, 93: 104-112.
- [8] López Felix Antonio, Martín Maria Isabel, García-Díaz Irene, et al. Recycling of glass fibers from fiberglass polyester waste composite for the manufacture of glass-ceramic materials[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2012, 3: 740-747.
- [9] Pickering S J, Kelly R M, Kennerley J. R, et al. A fluidized bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60 (4): 509-523.
- [10] Torres A, de Marco I, Caballero B M, et al. Recycling of the solid residue obtained from the pyrolysis of fiberglass polyester sheet molding compound[J]. *Advanced Polymer Technology*, 2009, 28 (2): 141-149.
-
- (上接第 1705 页)
- [3] Atipan Saimmai, Jittima Kaewrueng. Used lubricating oil degradation and biosurfactant production by SC-9 consortia obtained from oil-contaminated soil[J]. *Annals of Microbiology*, 2012, 62 (8): 1757-1767.
- [4] 包木太, 彭杰, 陈庆国. 微生物对聚丙烯酰胺降解作用的研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30 (9): 2080-2086.
- [5] Son Hyo-Jin, Park Yang-Ho. Development of supporting materials for microbial immobilization and iron oxidation[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, 12 (8): 59-66.
- [6] Georgiou D, Hatiras J. Microbial immobilization in a two-stage fixed-bed-reactor pilot plant for on-site anaerobic decolorization of textile wastewater[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2012, 37 (6): 597-605.
- [7] Michael D MacKinnonb, Phillip M Fedoraka. Polyacrylamide added as a nitrogen source stimulates methanogenesis in consortia from various wastewaters[J]. *Water Research*, 2005, 39 (2): 3333-3341.
- [8] Wen Qinxue, Chen Zhiqiang, Zhao Ye, Zhang Huichao. et al. Biodegradation of polyacrylamide by bacteria isolated from activated sludge and oil-contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175 (2): 955-959.
- [9] Jan P Eubeler, Marco Bernhard, Sabine Zok. Environmental biodegradation of synthetic polymers I. Test methodologies and procedures[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2009, 28 (9): 1057-1072.
- [10] Jan P Eubeler, Marco Bernhard. Environmental biodegradation of synthetic polymers II: Test biodegradation different polymers group[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2010, 29 (1): 84-100.
- [11] 包木太, 巩元娇. 微生物固定法降解含油污水的研究进展[J]. 化工进展, 2008, 28 (9): 511-517.
- [12] Wang Jianglong. Immobilization of microbial cells using polyvinyl alcohol(PVA)-polyacrylamide gels[J]. *Biotechnology Technology*, 2011, 9 (3): 203-208.
- [13] 冯晋阳, 藏娟, 吴小宁. UASB+生物接触氧化工艺饮料废水[J]. 环境工程, 2012, 30 (1): 22-24.
- [14] Lu Jianhang, Wu Laosheng. Spectrophotometric determination of substrate-borne polyacrylamide[J]. *Agriculture Food Chemistry*, 2002, 50 (3): 5038-5041.
- [15] 奚旦立. 环境监测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 95-97.
- [16] 高廷耀. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 199-200.
- [17] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 102-122.
- [18] 布坎南 R E, 吉本斯 N E. 简明伯杰细菌鉴定手册[M]. 第8版. 北京: 科学出版社, 1984: 212-245.
- [19] 陈庆国. 聚丙烯酰胺降解菌的筛选及降解聚丙烯酰胺污水的室内研究[D]. 青岛: 中国海洋大学化学化工学院, 2009.
- [20] 包木太, 洛克俊. 生物接触氧化法处理油田含聚污水室内模拟实验[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2009, 24 (1): 79-83.